

Präzisions Mikropositioniersysteme basierende auf dem Micro Harmonic Drive® Getriebe

Dr.-Ing. Reinhard Degen, Micromotion GmbH, Mainz, Deutschland

Kurzfassung

Die Vorteile der Miniaturisierung eröffnen neue Anwendungsgebiete für leistungsstarke Mikroaktuatoren in dynamisch wachsenden Märkten. Diese müssen jedoch zusätzlich zu miniaturisierten Außenabmessungen und geringem Eigengewicht ebenfalls ein spielfreies und präzises Positionierverhalten bereitstellen. Das Micro Harmonic Drive® stellt derzeit das weltweit kleinste spielfreie Mikrogetriebe dar. Durch die Kombination aus hoher Übersetzung, ausgezeichneter Wiederholgenauigkeit, gutem Wirkungsgrad und hoher Drehmomentkapazität eignet sich dieses Getriebe hervorragend für präzise Positionieranwendungen in der Halbleiterfertigung, in der Medizintechnik, in Messmaschinen, in optischen Systemen sowie in der Raumfahrt. Bisher benötigen Maschinen aufgrund des Einsatzes von konventioneller Antriebstechnik für die präzise Handhabung von Mikrobauteilen ein Vielfaches an Baugröße gegenüber den eigentlichen Bauteilen. Die Herausforderung für zukünftige Maschinenentwicklungen zur Herstellung und Handhabung von Mikrobauteilen besteht darin, die Abmessungen derartiger Präzisionsmaschinen an die Größe der Bauteile anzupassen und damit Vorteile durch zunehmende Genauigkeit und Dynamik ausnützen zu können. Hierzu werden schnelle, präzise und zuverlässige Antriebe für rotatorische und lineare Bewegungen benötigt, wobei zusätzliche Funktionalitäten, wie zum Beispiel eine Vakuumversorgung oder optische Elemente, in dem Mikropositioniersystem integriert sein müssen.

1 Anforderungen an die Antriebstechnik in Präzisions Mikropositioniersystemen

Seit es für miniaturisierte Systeme und hybride Mikrosysteme den Bedarf für eine Großserienmontage gibt, wird versucht, die Montageabläufe zu automatisieren. Bei derartigen Systemen, die aus Komponenten mit kleinsten Abmessungen bestehen, stellt die Montage oft den größten Kostenfaktor dar. Dieser kann dabei bis zu 80 % der gesamten Herstellkosten ausmachen [1]. Eine manuelle Montage ist entweder zu teuer oder kann keine ausreichende Prozessstabilität gewährleisten. Eine automatisierte Mikro-montage benötigt andererseits speziell angepasste Produktionseinrichtungen, um derartige kleine Komponenten handhaben zu können. Der Montageschritt benötigt typischerweise Bewegungen in mehreren Freiheitsgraden, die durch Antriebskomponenten, wie z. B. Motoren, Getriebe, Kugelgewindespindeln usw. erzeugt werden.

Bisher besitzen Maschinen für die präzise Handhabung von Mikrobauteilen ein Vielfaches an Baugröße gegenüber den eigentlichen Bauteilen. Die zukünftige Herausforderung besteht darin, die Abmessungen derartiger Präzisionsmaschinen an die Größe der Bauteile anzupassen. Hierzu werden schnelle, präzise und zuverlässige Antriebe für rotatorische und lineare Bewegungen benötigt, wobei zusätzliche Funktionalitäten, wie zum Beispiel eine

Vakuumversorgung oder Sensoren, in dem Mikropositioniersystem integriert sein müssen [2]. Mittlerweile existiert ein deutlicher Trend physisch kleinere Maschinen mit Mikroantriebstechnik auszurüsten. Derartige Maschinen benötigen gegenüber den früheren Maschinengenerationen eine sehr viel kleinere Aufstellfläche, erzielen aufgrund der Miniaturisierung oft eine höhere Montagegenauigkeit, können durch die geringeren Massen eine größere Dynamik realisieren und daher wirtschaftlicher produzieren.



Bild 1: Micro Harmonic Drive® Getriebe und Servoantrieb

Durch die Entwicklung miniaturisierter Motoren [3], [4] und der hochpräzisen und spielfreien Mikrogetriebe [5] wird den Mikroantriebssysteme der Zugang zu neuen innovativen Positionieranwendungen [6] eröffnet (siehe Bild 1).

2. Antriebskonzepte für Mikropositioniersysteme in der Mikromontage

Eine der Hauptanwendungsgebiete für Mikromontage-maschinen stellt die Elektronikbranche dar. So genannte „Die attach“ Maschinen werden in den Montageschritten innerhalb der „Back-End“ Prozesse eingesetzt. Mit dem Mikrogetriebe können „Rotary Bond Tools“ realisiert werden, die gleichzeitig eine hohe Genauigkeit im Bereich weniger Winkelsekunden, eine kurze Positionierzeit im Bereich weniger Millisekunden und ein extrem geringes Eigengewicht von wenigen Gramm besitzen (siehe Bild 2). Diese auf kleine Bauraumabmessungen und geringe Masse optimierte Einheit wird verwendet, um mit großer Dynamik die Chips während der Montage hochpräzise in jede beliebige Winkelstellung verdrehen bzw. ausrichten zu können.



Bild 2: Rotary Bond Tool für Hochgeschwindigkeitsanwendungen mit einem Gesamtgewicht von 22 Gramm und einer Wiederholgenauigkeit von $0,005^\circ$

In den Bereichen optischer Systeme werden häufig hochpräzise lineare Verstellmechanismen benötigt. Ein Beispiel hierzu ist der welt kleinste Micro Linear Pusher basierend auf der Micro Harmonic Drive® Technologie. Durch die Integration von Mikrogetrieben in dieses Mikrolinearverstellersystem werden die Vorteile dieser außergewöhnlichen Mikrogetriebe, wie Zuverlässigkeit, Positioniergenauigkeit und Spielfreiheit in ein extrem kompaktes und leichtes lineares Positioniersystem überführt. Das spielfreie Mikrolinearverstellersystem ist in einem Querschnitt von gerade einmal 10 auf 10 mm² untergebracht, besitzt eine Masse von nur 20 Gramm und ermöglicht Verstellwege bis 25 mm (siehe Bild 3).



Bild 3: Micro Linear Pusher mit Servomotor für lineare Mikropositionieraufgaben

Mit derartigen Systemen ist es möglich, eine Auflösung von bis zu $0,02 \mu\text{m}$ zu erreichen bzw. Verstellgeschwindigkeiten von bis zu $2,5 \text{ mm/s}$ zu realisieren. Die Wiederholgenauigkeit beträgt $\pm 1 \mu\text{m}$, wobei Verstellkräfte bis 12 N möglich sind.

Excenterantriebe zeichnen sich durch ihren einfachen Systemaufbau und die gleichzeitig damit erzielbare hohe Präzision aus. Durch die Kombination von Mikrogetrieben mit einem spielfreien Excentermechanismus können extrem leichte und kleine Positioniersysteme für hochpräzise Justagevorgänge im Submikrometerbereich realisiert werden (siehe Bild 4). Aufgrund der geringen Außenabmessungen und dem damit verbundenen extrem geringen Eigengewicht von weniger als 10 Gramm, sind derartige Systeme prädestiniert für den Einsatz in hochdynamischen Prozessen. Die Wiederholgenauigkeit derartiger Systeme erreicht bis zu $0,05 \mu\text{m}$. Selbst in extremen Umgebungsbedingungen, wie z. B. Ultra Hochvakuum, lassen sich derartige Systeme einfach integrieren.



Bild 4: Excenterantriebe: kleine und robuste Mikropositionierer

Es gibt eine Vielzahl von Justageaufgaben in der Mikromontagetechnik, die Bewegungen in drei Freiheitsgraden benötigen. Die Lösung für derartige Aufgaben stellt der 3-Achs-Mikropositionierer dar (siehe Bild 5).



Bild 5: 3-Achs Mikropositionierer für dynamische Mikromontageaufgaben

Diese kompakte Einheit mit einem Durchmesser von gerade einmal 36,2 mm und einer axialen Länge von weniger als 50 mm ist mit zwei linearen und einer rotatorischen Achse ausgestattet. Die Linearachsen werden von zwei Excenterantrieben angetrieben, die einen kleinen Verstelltisch in x- und y-Richtung bewegen. Auf dem Verstelltisch ist die Theta-Achse aufgebaut, mit der das Werkzeug direkt angetrieben wird. Diese Konstruktion bietet die folgenden Vorteile:

- Genauigkeit im Sub-Mikrometerbereich;
- Einfache Steuerung, da für alle Achsen Schrittmotoren verwendet werden;
- Geringe Masse (<50g);
- Hoch dynamische Performance.

Die bisherigen, auf konventionellen Antriebskonzepten beruhenden Mikropositioniermechanismen mit elektromagnetischen Antrieben können Bewegungen bis in den Submikrometerbereich erzeugen. Um mit konventioneller Antriebstechnik, d. h. mit elektromagnetischen Motoren Positioniervorgänge im einstelligen Nanometerbereich erzeugen zu können, werden jedoch neuartige Mikroverstellmechanismen benötigt. Diese müssen jedoch den besonderen Anforderungen bei derart kleinen Bewegungen an Steifigkeit, Führungseigenschaften und Regelbarkeit gerecht werden [7] [8] [9].

3. Nanostage: Nanometer genaue Positionierung

Gängige Positioniersysteme mit einer Auflösung im Bereich weniger Nanometer basieren bisher meist auf dem piezoelektrischen Effekt. Durch den Einsatz der-

artiger Techniken ergeben sich jedoch unterschiedliche Probleme:

- Positionsverlust bei einer Unterbrechung in der Spannungsversorgung;
- Lokaler Verschleiß, insbesondere bei Inch-Worm Antrieben;
- Ein direktes Wegmesssystem ist erforderlich;
- Ein kostenintensiver Regler ist notwendig;
- Überschwingen während des Positionierens;
- Kurzer Verstellweg im Vergleich zur Baugröße.

Die Besonderheit des neuen Nanopositioniersystems ist die Kombination eines hochpräzisen und hoch auflösenden Exzentermechanismus mit der kinematischen Struktur von monolithischen Festkörpergelenken. Die Antriebseinheit benötigt aufgrund des Schrittmotors nur eine sehr einfache Steuerungstechnik und besitzt gleichzeitig durch das Mikrogetriebe eine sehr hohe Auflösung (siehe Bild 6).



Bild 6: Der Nanostage: konventionelle Antriebstechnik für extreme Anforderungen an die Genauigkeit

Die Festkörpergelenke, die zum einen das Führungssystem darstellen und zum anderen eine zusätzliche Unteretzung der Bewegung realisieren, besitzen einen monolithischen Aufbau. Dadurch ist keine Montage erforderlich und Einflüsse von Montagefehlern, wie zum Beispiel asymmetrische mechanische Spannungen in den Gelenken, werden vermieden.

3.1 Rahmenbedingungen für das neuartige Nanopositioniersystem

Ziel dieser Entwicklung ist, mit möglichst einfacher Regelungstechnik hochpräzise Positionierbewegungen im einstelligen Nanometerbereich durchzuführen. Aus diesem Grund soll als Antrieb ein einfach anzusteuernder Schrittmotor verwendet werden. Einen großen Einfluss auf die Genauigkeit des Getriebes und damit auch auf die gesamte Systemgenauigkeit besitzt die Lagerung der Antriebswelle und der Abtriebswelle. Abweichungen im Rundlauf, aufgrund von Fertigungstoleranzen, Montagetoleranzen und Radialspiel in der Lagerung oder den Lagersitzen machen

sich direkt als Fehler im Übertragungsverhalten des Getriebes bemerkbar. Damit Positionierbewegungen im Nanometerbereich ermöglicht werden, sind die Anforderungen an die Rundlaufqualität der einzelnen Lagersitze zueinander und der Kugellager sehr hoch und dürfen nur wenige Mikrometer Abweichung aufweisen.

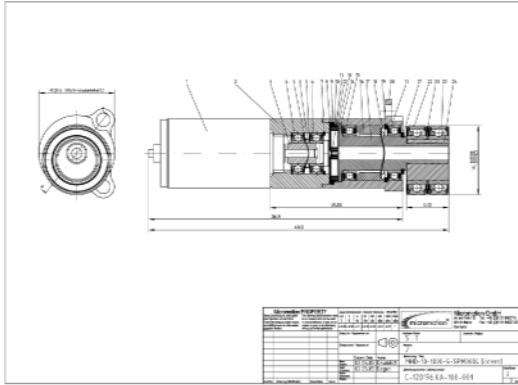


Bild 7: Schnitt durch den Getriebemotor mit seinen Lagerstellen und Excenter

Eine Übersicht über den Aufbau der Lagerung des Antriebsstranges ist in Bild 7 dargestellt. Um derartig hohe Rundlaufqualitäten erzielen zu können, müssen die Lagersitze so gestaltet werden, dass alle Passflächen in einer Aufspannung gefertigt werden können. Um den Radialschlag zu minimieren ist ein axiales Verspannen der Kugellager erforderlich. Durch das axiale Verspannen der Radialrillenkugellager laufen die Kugeln auf den qualitativ hochwertigen Seitenflächen der Innen- und Außenringe.

3.2 Struktursynthese des neu zu entwickelnden Positioniersystems

Bei dem Excenterantrieb resultieren die außergewöhnlichen Eigenschaften des Mikrogetriebes zum einen in einer hohen Qualität der Bewegungsübertragung und zum anderen in einer sehr hohen abtriebsseitigen Auflösung. Die Festkörpergelenkkinematik hat zwei Aufgaben:

1. sie dient als Führungssystem, das für Bewegungen im Nanometerbereich geeignet ist und
2. als Reduktionsgetriebe, um die großen Bewegungen des Excenter zu untersetzen und damit Bewegungen im Nanometerbereich zu erzeugen.

Die Festkörpergelenkkinematik ist monolithisch aufgebaut, damit eine Montage entfällt und dadurch negative Einflüsse durch Montagefehler vermieden werden (z. B. asymmetrische Spannungen in den Gelenkstrukturen durch ungleichmäßig angezogene

Schrauben oder Fluchtungsfehler der einzelnen Gelenke zueinander).

Die kinematische Kette besteht aus folgenden Komponenten:

- Schrittmotorantrieb mit 20 Vollschritten pro Umdrehung;
- hoch übersetzende Mikrogetriebebox mit einer Übersetzung von $i=1000$;
- Excenter mit 1 mm Excentrizität;
- Festkörpergelenkhebel mit einer Hebelübersetzung von 50:1.

Basierend auf diesen Randbedingungen erfolgt die Auslegung der Festkörpergelenkkinematik. Ziel für die Festkörpergelenkkinematik ist es, eine einfache Koppelgelenkführung einsetzen zu können und nicht eine wesentlich aufwendiger herzustellende 4-Gelenk-Federführung verwenden zu müssen.

Für die Auslegung der Gelenke sind folgende Zusatzforderungen berücksichtigt:

- möglichst dicke Federn,
- Werkstoff Al7022 mit einer zulässigen Spannung für die Einzelbelastung von 105 N/mm^2 ,
- Länge der Festkörpergelenkfeder 5,37 mm und Breite 4 mm,
- Minimaldicke 0,2 mm,
- Enddicke 0,266 mm,
- zulässige lineare Deformation $17 \mu\text{m}$ bei einer Kraft von 2,23 N und
- zulässige Winkeldeformation $16,2 \text{ mrad}$ bei einem Moment von $2,8 \text{ Nmm/rad}$.

Die aus diesen Randbedingungen abgeleiteten Gelenke resultieren in einer Längenverkürzung von nur $0,04 \mu\text{m}$ bei zulässiger linearer Deformation. Aufgrund der besseren Herstellbarkeit und der ausreichenden Führungsgenauigkeit, die aus der Federverkürzung bei Auslenkung resultiert, wird eine einfache 4-Feder Führung als bester Kompromiss aus Genauigkeit und Herstellkosten betrachtet und für die weiteren Optimierungsarbeiten gewählt.

Zur weiteren Ausarbeitung der Struktur der Festkörpergelenkkinematik müssen noch folgende Problemstellungen gelöst werden:

Problem 1:

Der Hebel hat bei Beschleunigung in z-Richtung die Möglichkeit abzuheben.

Lösung:

Durch eine federnde Verspannung des Excenterlagers zum Hebel wird ein Abheben verhindert.

Problem 2:

Der Hebel hat bei Beschleunigung quer zur Bewegungsrichtung oder Drehbeschleunigung um die Bewegungsrichtung die Möglichkeit zu gekoppelten Dreh-Translationsschwingungen mit Abrollbewegung auf dem Excenterlager. Diese muss weitgehend vermieden werden, denn die Federn tragen in dieser Bewegungsrichtung aufgrund ihrer dünnen Strukturabmessung nur sehr wenig Last.

Lösung:

Eine Abhilfe wird erreicht durch eine zusätzliche Blattfeder zwischen Hebel und Grundkörper mit einer Fläche normal zur Bewegungsrichtung.

Für die Konstruktion ist es weiterhin wichtig, dass die Motormontage justierbar ausgeführt sein muss, so dass die Hebelgelenke im Wesentlichen um den Excenterweg ausgelenkt werden.

3.3 Kinematische Kette

Aus den zuvor durchgeführten Überlegungen zur Federberechnung für den Nanoverstelltisch ergibt sich folgende Gelenkstruktur:

- die 2x2 Führungsfedern, durch welche die gewollte kleine Linearbewegung erzeugt wird, werden linear deformiert und sollen dabei nur sehr wenig Längenänderung aufweisen,
- die 2 Hebelfedern zur Erzeugung der zusätzlichen Untersetzung werden winklig (± 16 mrad) deformiert. Bei diesen Gelenken gibt es jedoch keine Forderung an die Längenkonstanz oder eine lineare Deformation,
- die Koppelfeder, durch die der Hebel gegen Längs- und Querkräfte geführt wird, besitzt gleichzeitig eine lineare ($70 \mu\text{m}$) und winklige (± 16 mrad) Deformation.

Die weitere Optimierung erfolgt hinsichtlich sehr kurzer und damit dünner Federn mit hoher Spannungsauslastung. Dadurch werden potentiell kurze Erodierzeiten erzielt. Bei einer zu dünnen Ausgestaltung der Federn müssen jedoch die zunehmenden Probleme beim Erodieren berücksichtigt werden.

3.4 Analyse und Festlegung der Hauptabmessungen für das Positioniersystem

In Bild 8 ist die Zusammenbauzeichnung für den Prototyp einer Festkörpergelenkinematik dargestellt. In der Ansicht oben links ist der Schnittverlauf für das Drahterodieren der Festkörpergelenkstrukturen dargestellt. Die Schnittbreite kann bei diesem Design weitgehend durch optimale Prozessparameter definiert werden. Entscheidend für die Funktion und die

Genauigkeitseigenschaften ist der Konturverlauf im Bereich der fünf Gelenke, die als Stege im Material verbleiben. Die Toleranz und die Rauheit müssen somit nur im Bereich der Gelenkstrukturen minimiert werden. In den anderen Bereichen können diese weit größer sein, wodurch nur in den kritischen Bereichen eine reduzierte Schnittgeschwindigkeit erforderlich ist. Die Erzeugung der Gelenkgeometrie erfolgt in einem Schnitt. Als Material wird getempertes Al7022/Al, bzw. Zn Mg Cu 0.5/3.4345 eingesetzt.

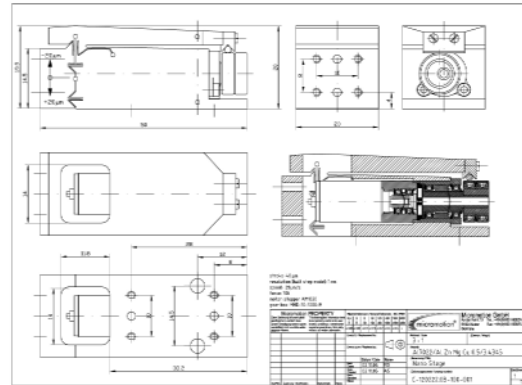


Bild 8: Zusammenbauzeichnung des Nanoverstellers

3.5 Experimentelle Untersuchungen am Nanostage

In ersten experimentellen Untersuchungen wurden das Auflösungsvermögen und die Übertragungsfunktion für dieses innovative Antriebskonzept gemessen. Als Messsystem für diese Versuche wurde ein kapazitiver Sensor mit einer Auflösung von 5 Nanometern eingesetzt.

Aufgrund des zur Verfügung stehenden Analog-Digital-Wandlers, an dem der kapazitive Sensor zur Auswertung in einem Messrechner angeschlossen wurde, konnten nur eine Auflösung von 10 Nanometern gemessen werden. Diese 10 Nanometer entsprechen einem Digit des Analog-Digital-Wandlers. Da die Auflösung nicht durch den Nanoversteller limitiert wurde sondern durch die Elektronik der Messwerterfassung, kann davon ausgegangen werden, dass ein Auflösungsvermögen und Schrittweiten im einstelligen Nanometerbereich durch dieses innovative Antriebskonzept möglich sind. Um weitere Untersuchungen zum Auflösungsvermögen durchführen zu können, soll in einem nächsten Schritt ein Laserinterferometer verwendet werden.

In Bild 9 ist die aus der Übertragungsfunktion abgeleitete Fast Fourier Transformation dargestellt. Die Fast Fourier Transformation dient dazu, die Fehleranteile der einzelnen Komponenten im Antriebsstrang des Nanoverstellers zu quantifizieren. Die Grundwelle stellt dabei den maximalen Hub des Nanoverstellers dar. Die erste Oberwelle stellt die Abweichung von

einer idealen Sinusschwingung dar und wird weitgehend durch die Nichtlinearität der Führungsgelenkfedern mit den Hebelgelenkfedern verursacht. Die nächst höheren Oberwellen werden durch Unrundheiten und Excentrizitäten der Kugellager verursacht.

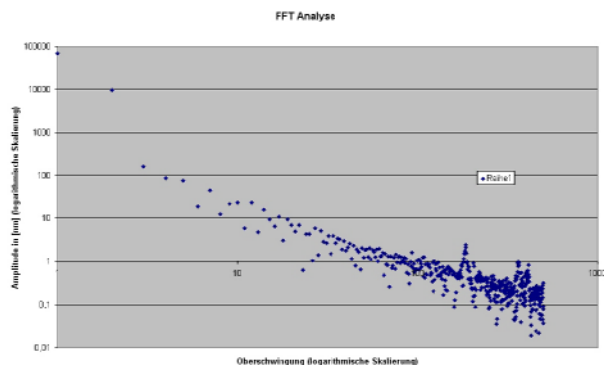


Bild 9: Fast Fourier Analyse eines Hubzyklus zur Identifikation der einzelnen Störungsanteile

Der Fehleranteil der einzelnen Maschinenelemente innerhalb des Antriebstranges ist in Bild 10 herausgefiltert. Der größte Fehleranteil an der absoluten Positioniergenauigkeit wird durch das nicht exakt lineare Verhalten der Festkörpergelenke der Hebel, Koppel und Führungsfedern hervorgerufen. Der größte Einfluss wird hierbei durch das nicht konstante Übersetzungsverhältnis des Hebels verursacht werden.

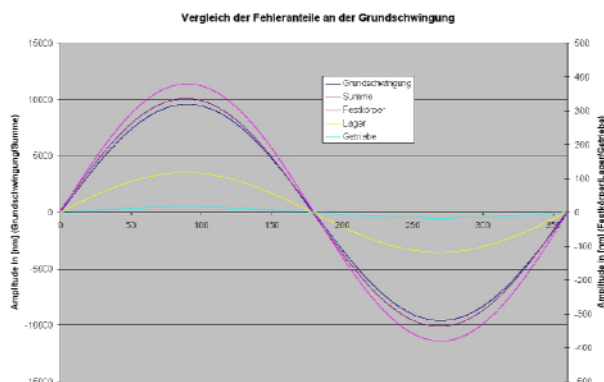


Bild 10: Anteiliger Einfluss der unterschiedlichen Maschinenelemente auf den Gesamtfehler

Einen weiteren großen Einfluss haben die Kugellager auf die Übertragungsgenauigkeit. Dabei spielen zum einen die Rundlauffehler durch Herstellung und Montage sowie Oberflächenqualitäten, d. h. Rauheit, eine entscheidende Rolle.

4 Ausblick

Sobald das Laserinterferometer zur Verfügung steht, sollen weitere Untersuchungen zu folgenden Punkten erfolgen:

- Messung der Übertragungsfunktion,
- Messung des Auflösungsverhaltens,
- Messung der Positioniergenauigkeit,

- Messung der Wiederholgenauigkeit und
- Messung der Führungsgenauigkeit, d. h. Abweichung des Schlittens von der Sollbahn.

In Bild 11 ist der erste Prototyp eines realisierten Nanoverstellers im Größenvergleich zu einer Hand dargestellt.

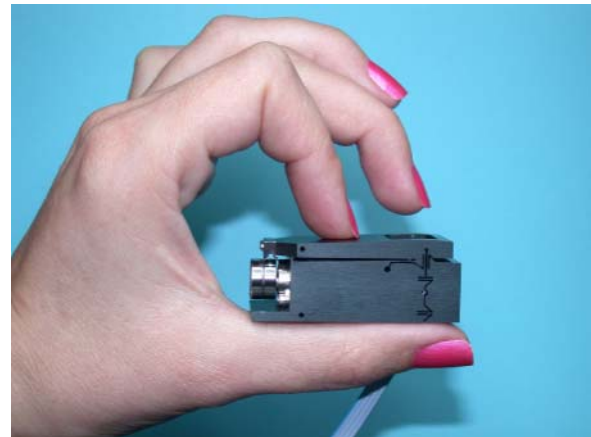


Bild 11: Realisierter Prototyp eines Nanoverstellers

5 Literatur

- [1] J. Hesselbach, A. Raatz: mikroPRO – Untersuchung zum internationalen Stand der Mikroproduktionstechnik, Vulkan Verlag, Essen, 2002
- [2] Dr. Reinhard Degen, Dr. Rolf Slatter: High Speed And Low Weight Micro Actuators For High Precision Assembly Applications, Proceedings of IPAS, Bad Gastein, 2006
- [3] C. Thürigen, W. Ehrfeld, B. Hagemann, H. Lehr, F. Michel: Development, fabrication and testing of a multi-stage micro gear system, Proceedings of Tribology issues and opportunities in MEMS, pp. 397-402, Columbus (OH)
- [4] S. Kleen, W. Ehrfeld, F. Michel, M. Nienhaus, H.-D. Stölting: Ultraflache Motoren im Pfennigformat, F&M, Jahrg. 108, Heft 4, Carl Hanser Verlag, München, 2000
- [5] R. Degen, R. Slatter: Hollow shaft micro servo actuators realized with the Micro Harmonic Drive®, Proceedings of Actuator 2002, Bremen
- [6] R. Slatter, R. Degen, A. Burisch: Micro Mechatronic Actuators for Desktop Factory Applications, Proceedings of the Joint Conference on Robotics, VDI Wissensforum IWB GmbH, München, 2006
- [7] S.T. Smith, D.G. Chetwynd, Foundations of Ultraprecision Mechanism Design, Taylor & Francis Books Ltd, 1998
- [8] A.H. Slocum: Precision Machine Design, Society of Manufacturing Engineers, 1992